



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Aprovechamiento Energético de los Lodos Obtenidos a Partir del Tratamiento de Aguas Urbanas

Autor: David Emilio Sagastume Alvarado

Tutor: Dra. Josefina Carlota Tapias Pantebre

Curs acadèmic: 2018-2019

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

ÍNDICE

1. Introducción	
1.1 Características de las aguas residuales urbanas.....	Pág. 1
1.2 Impactos de los contaminantes en cuerpos de agua	Pág.2
1.3 Proceso de depuración.....	Pág. 3
1.3.1 Recolección y conducción.....	Pág. 3
1.3.2 Tratamiento.....	Pág. 4
1.3.3 Línea de agua.....	Pág. 4
1.3.3.1 Pretratamiento.....	Pág. 4
1.3.3.2 Tratamiento primario.....	Pág. 5
1.3.3.3 Tratamiento secundario aerobio.....	Pág. 6
1.3.3.4 Tratamiento terciario.....	Pág. 7
1.3.4 Línea de lodos.....	Pág. 8
1.3.5 Digestión anaerobia.....	Pág. 8
2. Objetivos.....	Pág. 11
3. Material y métodos. Flujo Energético en Plantas de Depuración de Aguas Residuales	
3.1 Consumo energético en una EDAR.....	Pág. 12
4. Resultados y Discusión	
4.1 Potencial energético de los lodos.....	Pág. 14
4.2 Análisis de cobertura de demanda energética.....	Pág. 16
4.3 Análisis de cobertura de demanda energética con cogeneración.....	Pág. 17
5. Diseño de la planta de cogeneración de biogás	
5.1 Espesante gravitatorio.....	Pág. 20
5.2 Digestor anaerobio.....	Pág. 20
5.3 Gasómetro.....	Pág. 22
5.4 Antorcha.....	Pág.22
5.5 Motor de cogeneración.....	Pág.22
5.6 Diagrama de diseño final	Pág.23
6. Análisis Económico	
6.1 Situación económica actual	Pág.25
6.2 Situación económica según propuesta	Pág. 25
7. Conclusiones.....	Pág. 29
8. Bibliografía.....	Pág. 31
9. Anexos.....	Pág. 32

9.1 Biodigestor de referencia.....	Pág. 32
9.2 Motor de codigestión de referencia.....	Pág. 32
9.3 Espesador gravitacional de referencia.....	Pág. 33
9.4 Costo de inversión por kW instalado según reporte de IRENA 2018.....	Pág. 33
9.5 Costo de operación y mantenimiento por kW instalado según reporte de IRENA 2018.....	Pág. 34
10. Abstract.....	Pág. 35

1. INTRODUCCIÓN

El ser humano independientemente de su actividad diaria, ubicación geográfica, intensidad de uso energético, etc. significa un impacto medioambiental, es decir la influencia (sea positiva o negativa) de un ser humano hacia el ecosistema que lo rodea es inherente a su existencia; la clave de dicha influencia es la manera en que se mitigan los posibles daños que pueda sufrir la naturaleza debido a nuestra actividad humana y si es posible impactar positivamente en ella.

Parte muy importante de esta mitigación de impacto medioambiental es el tratamiento de aguas residuales provenientes de una aglomeración. Diariamente el ser humano utiliza cerca de 100 litros de agua para sus necesidades básicas como cocinar, higiene personal, lavado de platos, etc. y la mayor parte de esta agua utilizada es recolectada por los sistemas de desagüe doméstico, para luego transportarla a centros de tratamiento de agua residual urbana. El hecho de no tratar dicha agua previo a su vertido al medio, implica consecuencias graves dentro del mismo y a largo plazo para los cuerpos de agua como ríos, lagos y mares, por lo que se ha convertido en un paso imprescindible en la mayoría de ciclos de agua urbana.

El tratamiento de agua residual no solamente comporta un alto consumo energético, sino que también se generan residuos como subproducto del tratamiento, que de no ser manejados correctamente, podrían influir de igual manera o peor que si no se hubiese tratado el agua. Estos residuos suelen ser difíciles de manejar debido a su gran variedad y presencia de sólidos, compuestos tóxicos, metales, etc. pero si se centra en un pensamiento sostenible, es posible obtener un beneficio de una amenaza.

En el siguiente trabajo se explicarán brevemente los procesos generales de tratamiento de aguas residuales urbanas y de qué manera a partir de los residuos obtenidos de dicho proceso, se puede conseguir un sistema autosostenible, evitando el vertido de sustancias contaminantes pero energéticamente aprovechables al medio.

1.1 Características de las aguas residuales urbanas

El proceso de tratamiento de aguas residuales es de alta importancia para el cuidado ambiental de los ecosistemas. Los usos del agua son variados; domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos, etc. En función del uso, se incorporan en el agua diversos contaminantes y nutrientes como fósforo y nitrógeno, hasta químicos altamente tóxicos y letales para el medio ambiente.

Las aguas residuales urbanas recolectadas a través del sistema de drenaje pueden provenir de las siguientes fuentes:

- Aguas residuales domésticas:
 - Cocina (sólidos, materia orgánica, aceites, sales)
 - Lavadoras (detergentes, nutrientes)
 - Baños (jabones, geles, champús)
 - Aguas negras (provenientes del metabolismo humano como sólidos, materia orgánica, nutrientes, sales, etc.)
- Aguas residuales industriales
- Aguas de escorrentía pluvial

Estas aguas pueden contener una gran variedad de contaminantes como grasas, aceites, arenas, sólidos en suspensión, nutrientes, materia orgánica, productos químicos, agentes patógenos, etc. los cuales deben eliminarse previo a su desembocadura. Es necesario conocer los contaminantes y su concentración para determinar la calidad del agua. Conocer todos los contaminantes que puede contener el agua residual, es prácticamente imposible, se pueden encontrar cientos de compuestos inorgánicos y orgánicos. Sin embargo, es necesario caracterizar el agua residual, tanto de entrada en la estación depuradora, como en la salida de dicha estación, para dar cumplimiento a la directiva europea (91/271/CEE). Los parámetros más comunes que se determina son los siguientes:

- Sólidos en suspensión: representan una fracción de sólidos totales que quedan retenidos por una membrana de un tamaño específico de diámetro de poro (0,45 μm).
- Sustancias con requerimiento de oxígeno
 - Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO_5): es un indicativo de la materia orgánica biodegradable que contiene el agua. Se expresa mediante la concentración de oxígeno necesaria para degradar la materia orgánica biodegradable ($\text{mg O}_2/\text{L}$).
 - Demanda Química de Oxígeno (DQO): es un indicativo de la materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable. Se expresa mediante la concentración de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica, incluye la biodegradable y la no biodegradable $\text{mg O}_2/\text{L}$.
 - El índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) es de alta importancia dentro del ámbito de la calidad del agua, debido a que indica la biodegradabilidad de dicha agua:
 - $\geq 0,4$ aguas muy biodegradables
 - $0,2 - 0,4$ aguas biodegradables
 - $\leq 0,2$ aguas poco biodegradables

- Nutrientes: se miden (en mg/L) mediante diversas técnicas según el compuesto a determinar, como espectrofotometría, colorimetría, destilación, etc. Los nutrientes que se determinan en las aguas residuales, son el nitrógeno en todas sus formas (nitrógeno orgánico, amoníaco, nitratos y nitritos) y el fósforo (fosfatos orgánicos o polifosfatos).
- Grasas y aceites: se mide (en mg/L) a través de una extracción previa a través de un disolvente y su posterior evaporación.
- Organismos patógenos: se pueden determinar diversos organismos: microorganismo, parásitos, etc. Un buen indicador de contaminación fecal, muy utilizado hoy en día es la *E.coli*, se expresa en UFC/100 mL (UFC=unidad formadora de colonias). Como indicadores de parásitos, se utilizan los huevos de determinados parásitos intestinales, por ejemplo, los huevos de áscaris.

Como ya se ha comentado anteriormente, el agua residual urbana, es el conjunto de aguas procedentes de diversos usos; doméstico, industrial, comercios, limpiezas de calles, etc. Para el diseño de una estación depuradora es necesario conocer el caudal que puede llegar a la planta y la carga de la materia orgánica biodegradable (DBO₅). Para ello, la directiva europea (91/271/CEE), definió habitante equivalente como 60 gramos de DBO₅ al día, sin tener en cuenta su procedencia. Actualmente las estaciones depuradoras se diseñan por habitante equivalente, no por habitantes reales. La población equivalente se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Población\ equivalente = \frac{Caudal * Concentración\ DBO_5}{60}$$

1.2 Impactos de los contaminantes en cuerpos de agua

Luego de repasar los contaminantes y sus parámetros de medición, es clara la razón por la cual es necesario un proceso de depuración de agua residual urbana. Si este proceso no existiera, podrían darse los siguientes casos:

- a) Agotamiento del contenido de oxígeno: cuando el agua contiene componentes residuales fácilmente oxidables, estos se degradarán de manera aerobia debido a los microorganismos presentes, consumiendo parte del oxígeno disuelto en este proceso; si este consumo es excesivo, la concentración de oxígeno disminuirá por debajo del mínimo necesario para el desarrollo de la vida acuática, causando la muerte de la fauna y flora del cuerpo de agua. Si se llega a consumir todo el oxígeno, puede dar paso a una descomposición anaerobia, generando malos olores, debido a los procesos de reducción.
- b) Generación de fangos y materia en suspensión, causando concentración de materia en el fondo de los cauces debido a su fracción sedimentable, mientras que la fracción no sedimentable flota, concentrándose en la superficie y orillas del cuerpo de agua; estas acumulaciones impiden la entrada de luz solar, además de agotar el oxígeno disuelto,

ya que la mayor parte de los sólidos son de materia orgánica biodegradable, reduciendo las posibilidades de vida en el agua, además de malos olores.

- c) Exceso de nutrientes: el nitrógeno y el fósforo son los principales nutrientes presentes en las aguas residuales urbanas, lo que causa el crecimiento descontrolado de algas y otras plantas, efecto conocido también como eutrofización. Produciéndose también una disminución de la concentración de oxígeno, con sus implicaciones.
- d) Daños a la salud pública: los patógenos presentes en las aguas residuales pueden fomentar la transmisión de enfermedades como tifus, hepatitis, cólera y disentería a partir de virus, protozoos, helmintos y bacterias

1.3 Proceso de depuración

1.3.1 Recolección y conducción

Los sistemas de recolección de aguas residuales, puede ser de dos tipos: unitarios o separativos. Los sistemas unitarios conllevan conjuntamente tanto las aguas residuales, como las aguas pluviales a la misma estación depuradora. En los sistemas separativos, circulan independientemente las aguas residuales y las pluviales, por tanto van a estaciones depuradoras distintas. La recogida y distribución de las aguas residuales urbanas se realiza a partir de una compleja red de tuberías donde participan alcantarillas y colectores de agua, dirigiéndola, utilizando el efecto de la gravedad o fuerza de bombeo, hacia las plantas de tratamiento.

El caudal puede verse afectado en la época de lluvia aumentando peligrosamente, pudiendo dañar los colectores y las obras de la planta de tratamiento, por lo que se requiere uno o más sistemas aliviaderos que permiten derivar los excesos de caudal y disminuir dicho caudal, protegiendo los componentes de la planta. Se suele instalar un “bypass” general a la entrada de la estación depuradora para desviar las aguas residuales en el caso de que la planta sufra de algún desperfecto.

1.3.2 Tratamiento

Es un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas que buscan mitigar lo más posible la contaminación presente en aguas residuales para devolverla al medio con poca o nula influencia en el cuerpo de agua donde se vierta, y cumpliendo la normativa vigente de cada país. Normalmente, la depuración contempla dos vías de tratamiento:

- Línea de agua: todos aquellos procesos que disminuyen los contaminantes en el agua a tratar
- Línea de lodos: corriente de subproductos generados como resultado de los procesos de la línea de agua

Se analizará cada línea por separado:

1.3.3 Línea de agua

Esta línea puede estar compuesta por diversas etapas, las cuales se analizarán a continuación.

1.3.3.1 Pretratamiento

Antes de que las aguas residuales pasen al tratamiento, deben de someterse a un proceso en su mayoría físico y mecánico con el objetivo de separar del agua los materiales sólidos que puedan afectar las posteriores etapas. Este se divide a su vez en:

1. Separación de sólidos grandes

Se ubica al inicio de la instalación a través de un pozo de gruesos para separar los elementos de gran tamaño o grandes cantidades de arena. Este pozo presenta en su parte inferior una forma de tronco de pirámide invertida, concentrando los sólidos para su fácil extracción, la cual se realiza a través de una cuchara bivalva, depositando los residuos sólidos en contenedores para dirigirlos a un vertedero.

Figura 1. Cuchara bivalva



Fuente: Wikibooks (2016), Ingeniería de Aguas Residuales, Recuperado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Bivalva_3.jpg, consultado el 26 de abril de 2019.

2. Desbaste

Es el proceso de eliminación de sólidos de mediano y pequeño tamaño como trapos, raíces, toallitas higiénicas, etc. que pudiesen dañar u obstruir los equipos de la planta de tratamiento. Esto se logra utilizando rejillas de desbaste grueso (paso entre 50 y 100 mm) y desbaste fino (paso entre 10 y 25 mm). La configuración de las rejillas puede ser curva o recta según el diseño de extracción y posteriormente a su captación, los residuos son compactados para transportarlos hacia un vertedero.

3. Tamizado

Se trata de un proceso de filtrado con el objetivo de reducir la concentración de sólidos en suspensión del agua a tratar a partir de un soporte compuesto de ranuras de paso; estos pueden ser autolimpiantes, rotativos y deslizantes. El agua a través del

tamiz donde los sólidos de mayor diámetro al paso (normalmente entre 0,2 y 3mm) son retenidos y transportados por gravedad a través de un ángulo de inclinación de la reja, para acumularlos en un contenedor.

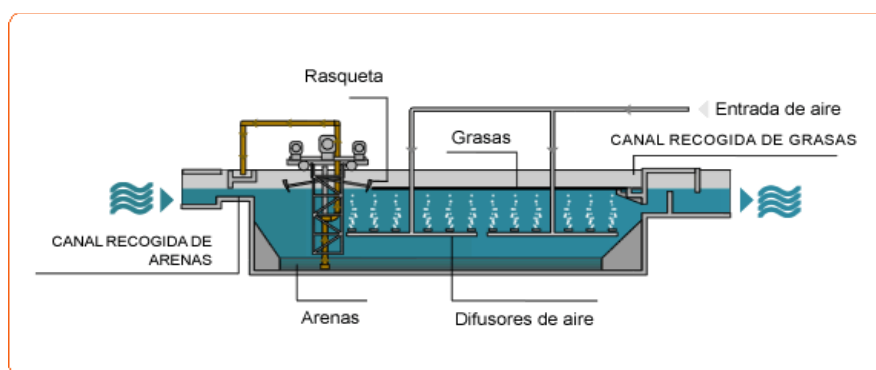
4. Desarenador

Su objetivo principal es eliminar todos aquellos sólidos con diámetro inferior al paso del tamiz para evitar su sedimentación en canales y daño a las bombas por abrasión. Se suelen eliminar arenas, gravas, partículas minerales, granos, huesos, cáscara de fruta, etc. y pueden funcionar con flujo variable o flujo constante.

5. Desengrasado

Paso del proceso en el cual se eliminan la materia grasa y cualquier flotante densidad menor que el agua; este proceso puede ser a través de desengrasadores estáticos y dinámicos. Los procesos estáticos utilizan un tabique que obliga a las aguas a circular por la parte inferior del tanque, reteniendo los componentes de menor densidad en la superficie, los cuales son retirados manualmente. Otro sistema utilizado son los aireados, estos se basan en inyectar aire para conseguir desemulsionar las grasas, y conseguir que floten y puedan ser posteriormente retiradas. Normalmente estos procesos se realizan simultáneamente con los desarenadores.

Figura 2. Sistema desarenador y desengrasante por aire



Fuente: Francesc S., Estudios EDAR, Estación Depuradora. Recuperado de <https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.html>, consultado del 29 de marzo de 2019.

Al final del proceso de pretratamiento, se suelen instalar medidores de caudal, los cuales si bien no ejercen ningún efecto en el proceso, son herramientas muy útiles para determinar las condiciones operativas de cada etapa y obtener datos del coste de tratamiento por unidad de volumen.

1.3.3.2 Tratamiento primario

La finalidad principal del tratamiento primario es eliminar los sólidos en suspensión remanentes del pre-tratamiento y reducir la contaminación biodegradable causada por dichos sólidos. Este proceso se puede dividir en dos etapas:

1. Decantación primaria

Elimina los sólidos sedimentables utilizando la gravedad, representando un paso muy importante en el proceso ya que estos sólidos suelen generar una alta demanda de oxígeno para su biodegradación.

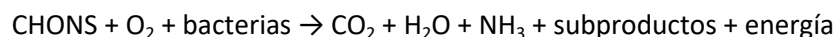
2. Tratamiento fisicoquímico

Utiliza reactivos químicos para reducir los sólidos en suspensión mediante procesos de coagulación-floculación-sedimentación. El objetivo principal de este proceso es agrupar los sólidos en suspensión presentes, mediante la formación de flóculos. Estos flóculos al tener mayor tamaño y volumen que los sólidos individualmente, pueden sedimentar más fácilmente, consiguiéndose así su eliminación. Con esto se evitan sobrecargas que dificulten el tratamiento biológico siguiente, además de controlar las fluctuaciones estacionales de caudal y se puede reducir el contenido de fósforo cuando sea necesario.

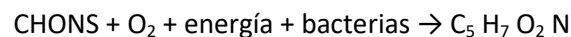
1.3.3.3 Tratamiento secundario aerobio

Es la fase en donde se elimina la materia orgánica biodegradable principalmente soluble. Este tratamiento se realiza mediante microorganismos, en gran parte bacterias que descomponen la materia orgánica en condiciones aeróbicas (en presencia de oxígeno), causando que una parte de la materia se oxide y la otra se convierta en tejido celular nuevo

Oxidación:

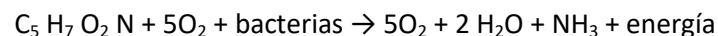


Síntesis:



Donde CHONS son los elementos de la tabla periódica predominantes en la materia orgánica

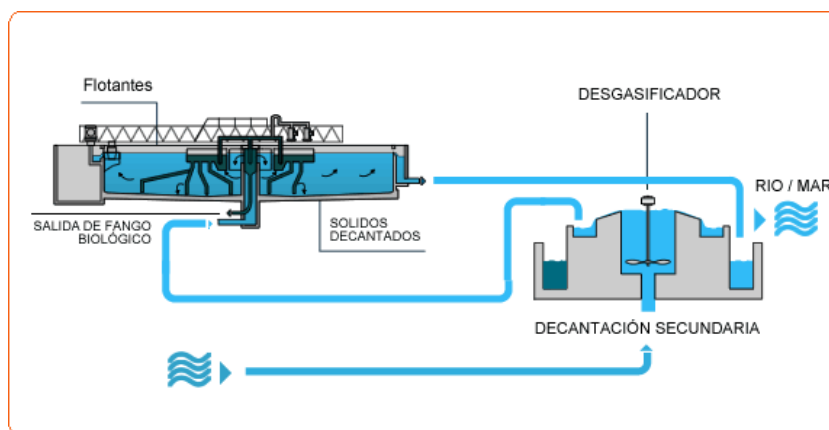
En la última etapa cuando la materia orgánica disponible es consumida, las células consumen su propio tejido celular para generar la energía necesaria para el mantenimiento celular, lo cual se conoce como **respiración endógena**



Para mantener el oxígeno requerido en estas tres reacciones se introduce aire en los reactores biológicos donde las mismas suceden. La reacción de síntesis genera nuevas bacterias, las cuales tienen a unirse en un proceso de floculación, formando agregados de mayor densidad que el agua tratada, absorbiendo la materia en forma coloidal.

Durante este proceso se genera la mayor cantidad de lodos o fangos activos, los cuales se conducen a una etapa posterior de sedimentación (decantación o clarificación secundaria), donde son separados del agua tratada por gravedad. Una parte de estos lodos se purga y otra se recircula al reactor biológico para mantener una concentración ideal de microorganismos.

Figura 3. Tratamiento Secundario aerobio



Fuente: Francesc S., Estudios EDAR, Estación Depuradora. Recuperado de <https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.html>, consultado del 29 de marzo de 2019.

1.3.3.4 Tratamiento terciario

Esta etapa también es conocida como tratamiento avanzado ya que permite obtener efluentes finales de mejor calidad para verter el agua tratada en zonas con requisitos más exigentes, como son la eliminación de nutrientes: fósforo y nitrógeno. Generalmente para la eliminación de fósforo sales de hierro y aluminio en procesos de precipitación. También se puede eliminar mediante microorganismos, en donde el fósforo se almacena en los microorganismos que luego se extraen como lodos en exceso.

Para la eliminación del nitrógeno se utiliza un proceso biológico de forma secuencial, nitrificación y desnitrificación, liberando el nitrógeno a la atmósfera en forma de nitrógeno gaseoso.

En la Tabla 1 se muestran los rendimientos que se pueden conseguir en una planta depuradora.

Tabla 1. Rendimientos de procesos de tratamiento de aguas residuales

	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	DBO5	<i>Escherichia coli</i>
Pretratamiento	5 – 15	5 – 10	10 – 25
Tratamientos primarios	40 – 70	25 – 40	25 – 70
Tratamientos secundarios	80 – 90	80 – 95	90 – 98
Tratamientos terciarios	90 – 95	95 – 98	98 – 99

Fuente: Secretariado Alianza por el Agua, Ecología y Desarrollo (2008), Manual de Depuración de Aguas Residuales, página 39, figura 7.

1.3.4 Línea de lodos

Los lodos son subproductos provenientes de las distintas fases de tratamiento de las aguas residuales y estos pueden ser:

- Lodos primarios: aquellos sólidos producto de la decantación del tratamiento primario
- Lodos secundarios o biológicos: provenientes de la decantación del clarificador luego que el agua pase a través del reactor biológico

Estos lodos deben de ser tratados pasando por varios procesos previo a su disposición. Estos son:

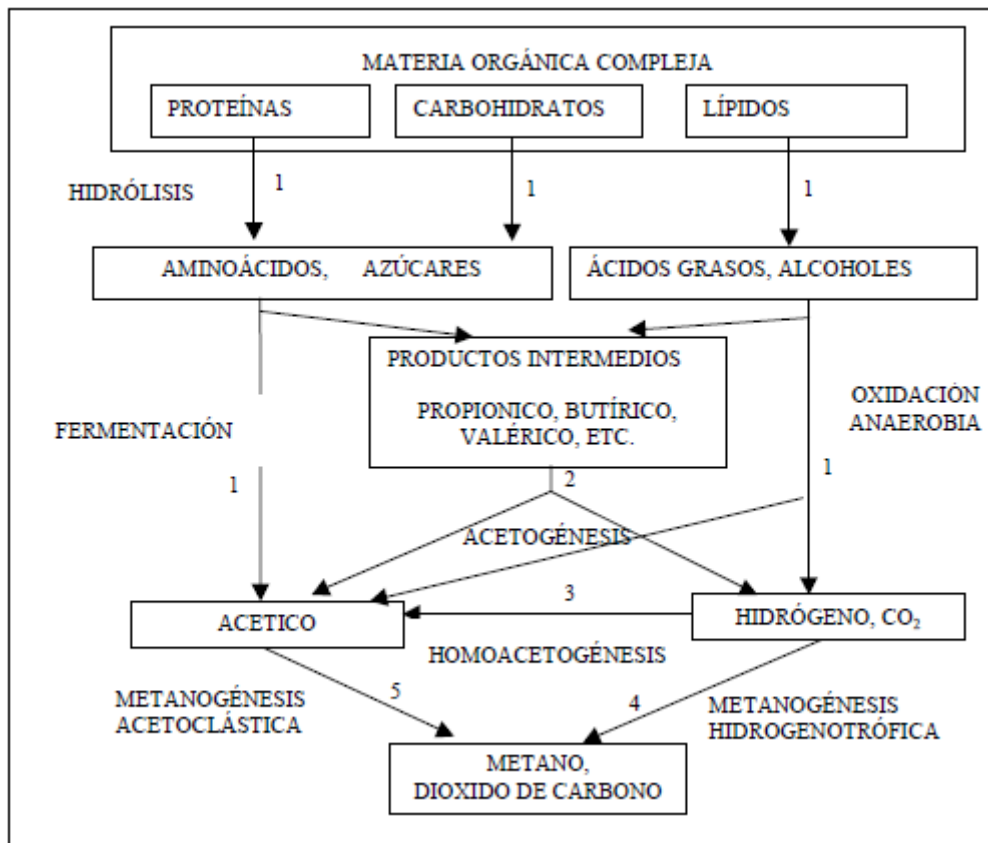
1. Espesamiento: se aumenta la concentración de los lodos a partir del efecto gravitacional y de flotación, lo que elimina parte del agua que lo compone (más adecuado para lodos biológicos)
2. Estabilización: en este paso se evita la descomposición de los lodos a través de una reducción biodegradable, la cual normalmente es una digestión anaerobia (eliminando 40-50% de la materia orgánica), pero también se puede utilizar una estabilización química (elevación del pH utilizando cal) o tratamiento térmico.
3. Acondicionamiento: a partir de productos químicos se mejora la deshidratación de los lodos para eliminar el agua que pueda quedar.
4. Deshidratación: utiliza partir de la deshidratación se facilita el transporte y manejo de los lodos utilizando varios métodos como secado térmico, centrifugación, filtros, etc.

1.3.4.1 Digestión anaerobia

Este es un proceso fundamental para disminuir al mínimo los desechos provenientes de la línea de lodos de una planta depuradora, ya que si se logra mejorar la eficiencia del proceso, se lograría un mayor consumo de la materia orgánica, mayores volúmenes de biogás generados y menos lodos restantes. El proceso se lleva a cabo en un reactor totalmente cerrado en ausencia de oxígeno, reteniendo los lodos durante períodos de tiempos variables, obteniéndose lodos estabilizados no putrescibles y con bajo contenido de patógenos; este proceso se basa en 4 etapas, las cuales se describen a continuación (Figura 4):

- a) Hidrólisis o licuefacción: los compuestos orgánicos como carbohidratos, grasas y proteínas son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular, por lo que se le consideran exoenzimas; este paso es la conversión de los polímeros en monómeros con la ayuda de bacterias.
- b) Acidogénesis: los compuestos orgánicos solubles resultantes de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos como el ácido acético, propiónico y butírico. El pH es ácido (entre 4 y 6)
- c) Acetogénesis: también es conocida como acidogénesis intermediaria y es la etapa en la cual los productos son convertidos en ácido acético, además de CO_2 , H_2 y alcoholes.
- d) Metanogénesis: utilizando bacterias metanogénicas se transforma el ácido acético en metano (CH_4), además de la mezcla H_2 y CO_2 . El pH es básico (entre 7 y 7,8).

Figura 4. Proceso de Biodigestión



Fuente: Campos E., Flotats X. (2011), Aprovechamiento Energético de los Lodos Residuales y Purines. Producción de Biogás., Página 5.

Dentro de este proceso existen muchos parámetros que dictan la velocidad, desarrollo y eficiencia del mismo:

- Temperatura:** esta puede depender del tipo de reactor, pero óptimamente en un proceso estándar con bacterias mesofílicas esta se encuentra cercana de los 35°C.
- Acidez:** es de suma importancia, ya que determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, encontrándose el punto óptimo entre 6,6 y 7,6 de pH; esto se logra a través de la adición de nutrientes.
- Contenido en sólidos:** una proporción mayor al 10% de sólidos puede dificultar el proceso de biodigestión, ya que esta mejora con lodos de alto contenido de humedad.
- Nutrientes:** es imperativo el contar con nutrientes que fortalecen la actividad y el crecimiento de las bacterias al contener fósforo, azufre, nitrógeno, carbono y sales. Las cantidades de nitrógeno y fósforo deben de ser compatibles con la cantidad de carbono, normalmente 25 partes de carbono por cada parte de nitrógeno.
- Agitación:** los reactores requieren cierta energía mecánica para favorecer la transferencia de sustrato a la población de bacterias, además también es importante mantener bajas las concentraciones de materias inhibitoras, para que no afecten a la población de bacterias, inhibiendo el proceso.

- f) Tóxicos: deben de eliminarse, ya que su presencia en cantidades elevadas pueden inhibir el proceso. El nitrógeno, amoníaco, azufre, oxígeno, sales minerales, detergentes, pesticidas, metales pesados, etc., detienen el proceso.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la viabilidad tanto económica como energética de la utilización de lodos como fuente energética en una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas, utilizando un proceso de digestión anaerobia termófila junto con un motor de cogeneración.

Objetivos Específicos

1. Estimar el potencial energético de los lodos de entrada que reciban tres plantas hipotéticas ubicadas en el área de Girona para determinar la cantidad de demanda energética que se podría cubrir con dichas condiciones de entrada.
2. Evaluar la viabilidad económica de la propuesta a través de métodos de análisis de inversiones como valor actual neto, tasa interna de retorno y tiempo de recuperación de la inversión inicial o payback.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo, se han tenido en cuenta:

- Los datos de consumo de energía en el ciclo del agua procedentes de la Agencia Catalana del Agua
- Los análisis de lodos procedentes de tres estaciones depuradoras urbanas del área de Girona
- Un método cuantitativo para la estimación del potencial energético de los lodos según los análisis de DQO y caudal de los lodos que ingresen a la planta depuradora.
- Los datos de costos de instalación y mantenimiento para proyectos de energías renovables según IRENA.

3.1. Consumo energético en una EDAR

Dentro del ciclo del agua, el proceso de depuración de las aguas residuales, es el que consume mayor cantidad de energía por metro cúbico procesado. Este consumo puede variar de una planta a otra según su antigüedad, tipo de proceso y sobre todo la fuente de energía.

El ciclo del agua incluye diversas fases: iniciando por su captación, luego potabilización, transporte y distribución (utilización), vertido y depuración, requiriendo cierta cantidad de energía en cada una de ellas. En la tabla 2 se muestran los consumos aproximados de cada una de las partes que integran el ciclo del agua.

Tabla 2. Consumos de energía en el ciclo del agua

Datos del año 2016	Ratio kWh/m ³	Hm ³ /año	GWh/año
Captación y transporte	0,230	799	184
Potabilización	0,070	759	53
Desalinización	3,30	12	40
Distribución	0,240	628	151
Depuración	0,440	668	294
Reutilización	0,100	26	3
Total		2.892	724

Fuente: Agencia Catalana del Agua (ACA)

Según estos los datos de la tabla 4, si se obvia la poca contribución de la desalinización (12 Hm³/año), la parte del ciclo del agua que consume más energía es el proceso de depuración. El consumo medio de una depuradora es de 0,440 kWh/m³, casi el doble de la distribución (0,240 kWh/m³).

Por tanto si se quisiese implementar un plan de eficiencia y ahorro energético, en alguna etapa del ciclo del agua, sería conveniente iniciarlo en la etapa de la depuración, mediante posibles mejoras y disminuciones de consumo.

Pero ¿cómo se distribuyen estos consumos dentro de la planta depuradora?

Los consumos en la planta depuradora provienen principalmente de las bombas que mantienen el flujo del agua en continuo y de los aireadores, y en menor proporción de los agitadores, purgadores y centrifugadores.

Tabla 3. Consumos energéticos de una EDAR

	Caudal en verano (m ³ /día)	Caudal en invierno (m ³ /día)	Hab. Eq.	Consumo bombas de entrada (kWh)	Consumo aireadores (kWh)	Consumo agitadores (kWh)	Consumo bombas de purga/recirculación (kWh)	Consumo centrifugadores (kWh)	Total (kWh)
Planta A	3100	2100	6440	240,98	596,13	22,22	3,59	82,40	945,31
Planta B	2800	2100	3887	1089,20	137,00	29,68	40,59	42,64	1339,12
Planta C	2400	1500	7982	276,58	210,97	96,00	54,32	115,54	753,41

Fuente: Aportación confidencial de plantas depuradoras dentro del territorio catalán

En la tabla 3, se muestran los consumos de las diferentes etapas de la depuración de las aguas residuales. Estos valores se han obtenido de tres plantas depuradoras ubicadas en el territorio catalán, zona de Girona.

A pesar de que las tres plantas depuran el agua mediante tratamientos convencionales, las diferencias son considerables, esto se debe principalmente al tiempo de utilización y la potencia instalada. Estas diferencias se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Potencias y tiempos de utilización

	Bombas de entrada		Aireadores		Agitadores		Bombas de purga/recirculación		Centrifugadores		Potencia total (kW)
	Potencia total (kW)	Tiempo medio de uso (h/día)	Potencia total (kW)	Tiempo medio de uso (h/día)	Potencia total (kW)	Tiempo medio de uso (h/día)	Potencia total (kW)	Tiempo medio de uso (h/día)	Potencia total (kW)	Tiempo medio de uso (h/día)	
Planta A	28,76	8,38	60,00	9,94	7,10	1,56	1,9	0,95	30,05	2,74	127,81
Planta B	81,82	15,85	16,64	2,28	3,71	8,00	8,8	4,13	24,6	1,73	135,57
Planta C	36,50	6,23	30,00	7,03	4,00	24,00	8	6,79	20,35	5,68	98,85

Fuente: Aportación confidencial de plantas depuradoras dentro del territorio catalán

Hoy en día la mayoría de las plantas depuradoras utilizan la red eléctrica para cubrir con la demanda de la energía que requiere la misma. Esto implica importantes cantidades monetarias destinadas a cubrir las facturas de electricidad como es el caso de las tres plantas analizadas anteriormente.

Los lodos generados en los procesos de depuración son normalmente procesados y vendidos como abono a la industria agrícola, lo que puede generar ciertos ingresos adicionales para destinar hacia el funcionamiento de la planta. Existe la posibilidad de que dicha planta trabaje de manera auto sostenible. Los lodos obtenidos durante el proceso de depuración son ricos en materia orgánica y una DQO adecuada para la producción de biogás, lo cual se analizará a continuación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Potencial energético de los lodos

Para determinar la viabilidad del proyecto, es imperativo primero conocer el potencial energético de los lodos del lugar, el cual varía según la localidad ya que la composición del mismo es dependiente de las actividades que se desarrollen en el área. En nuestro caso al tratarse de aguas urbanas, los indicadores de DQO y DBO₅ suelen mantenerse en un rango no muy amplio, pero para evitar desviaciones demasiado grandes, se utilizarán datos reales ya tomados anteriormente.

Al desconocerse la ubicación exacta de las plantas mencionadas en el apartado anterior (conociéndose solamente que se encuentran en el área de Girona), se inferirá que las tres

estaciones depuradoras se alimentan de las aguas residuales provenientes de distintas aglomeraciones urbanas, que una vez depuradas, vierten sus aguas al río Ridaura.

En la tabla 5 se muestran los valores promedio de los análisis realizados a los lodos de decantación primaria y secundaria de plantas depuradoras en el área de Girona.

Tabla 5. Características de los lodos

	Entrada al digestor	Salida del digestor	Rendimiento
SST (g/L)	18.260	16.520	9,5%
SSV (g/L)	15.160	12.960	14,5%
DQO (ppm)	20.212	14.864	26,5%

Fuente: T. Martí et al

Según la bibliografía¹ los datos que se muestran en la tabla 5, provienen de los análisis realizados en dos muestras de la línea de fangos de una estación depuradora.

Según dicho estudio, el volumen del metano generado se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_{Metano} = F_{CONV} * Q_F * S$$

En donde:

- $F_{CONV} = 0,35 \text{ m}^3 \text{ metano/kg DQO}$
- $S = \text{demanda química de oxígeno de los lodos de entrada (DQO, kg O}_2/\text{m}^3)$
- $Q_F = \text{caudal de fangos que ingresa al biodigestor}$

Por tanto para contar con las variables de la ecuación, se requiere conocer dos datos más: el caudal de fangos que ingresa en el biodigestor y la densidad de dichos fangos.

En los análisis realizados se determinó la densidad de los fangos, obteniéndose el siguiente resultado:

$$\rho_{fangos} = 1,0155 \frac{kg}{L}$$

Según la bibliografía, luego de los procesos primarios y secundarios de la depuración del agua, además del espesamiento de los lodos, aproximadamente un 0,1% del caudal de agua que ingresa a la planta se convierte en lodo².

Además para utilizar las dimensiones correctas, es necesario conocer la concentración de la DQO (mostrada en la tabla 5) de los fangos expresada en kg de O₂/m³, por lo que se debe tomar el resultado del DQO de los lodos en kg O₂/m, tomando en cuenta la densidad, con lo que se obtiene:

¹ T. Martí, M. Rovira, I. Vila (2009) Implantació de la Digestió Anaeròbia en la EDAR de Castell-Platja d'Aro, Universitat de Girona, p. 61.

² T. Martí, M. Rovira, I. Vila (2009) Implantació de la Digestió Anaeròbia en la EDAR de Castell-Platja d'Aro, Universitat de Girona, p. 63.

$$S = 20.212 \text{ ppm} = 20.212 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L fangos}} * \frac{1000 \text{ L fangos}}{1 \text{ m}^3 \text{ fangos}} * \frac{1 \text{ kg O}_2}{1 * 10^6 \text{ mgO}_2} = 20,212 \frac{\text{kgO}_2}{\text{m}^3 \text{ fangos}}$$

Tomando en cuenta la densidad, $S = 20,57 \text{ kg O}_2/\text{m}^3 \text{ fangos}$.

Ya con los datos necesarios, se puede sustituir en la ecuación y obtener los metros cúbicos de metano, además del volumen de biogás al considerar un 67% de metano por cada 100% de biogás. Por lo tanto:

Tabla 6. Volumen de metano

	Caudal de agua en verano (m ³ /día)	Caudal de agua en invierno (m ³ /día)	Caudal fangos en verano (m ³ /día)	Caudal fangos en invierno (m ³ /día)	Volumen de metano verano (m ³ /día)	Volumen de metano invierno (m ³ /día)	Volumen de biogás verano (m ³ /día)	Volumen de biogás invierno (m ³ /día)
Planta A	3100	2100	31	21	222,70	150,86	332,39	225,17
Planta B	2800	2100	28	21	201,15	150,86	300,22	225,17
Planta C	2400	1500	24	15	172,41	107,76	257,33	160,83

Fuente: elaboración propia

Por último para conocer el potencial energético de los lodos, se debe de multiplicar el volumen de biogás generado por el poder calorífico superior (PCI) del mismo, aproximadamente 21.770 kJ/m³ (según IDAE, 2019), asumiendo una eficiencia de la caldera del 34%, se obtendrían los resultados que se muestran en la tabla 7.

Con los datos de los potenciales de generación energética, se puede proceder a evaluar el proyecto a través de una comparación de demanda energética, lo cual se analizará a continuación.

Tabla 7. Potencial de generación eléctrica

	Potencial energético verano (kW)	Potencial energético invierno (kW)	Potencia eléctrica generada verano (kW)	Potencia eléctrica generada invierno (kW)
Planta A	83,75	56,73	28,48	19,29
Planta B	75,65	56,73	25,72	19,29
Planta C	64,84	40,52	22,05	13,78

Fuente: elaboración propia

4.2 Análisis de cobertura de demanda energética

Al contar con el potencial energético, se recurrirá a los datos mostrados anteriormente en la tabla 4, donde se detallan las potencias de los equipos que demanden energía eléctrica en la planta, estimando el porcentaje de potencia instalada que se puede cubrir con la energía proveniente del biogás de los lodos (Tabla 8). A esta tabla se le agregaron los consumos estimados de los equipos a utilizar dentro del proceso de biodigestión, los cuales requieren

bombas y agitadores que consumen energía. En el caso del espesante gravitatorio se tiene un motor de 1,5 kW y el biodigestor un agitador de la misma potencia; asumiendo una utilización de 8 horas al día de ambos casos se tendría una potencia total de 3 kW y una energía consumida de 24 kWh.

Tabla 8. Porcentaje de potencia eléctrica cubierta

	Potencia total instalada (kW)	Potencia total junto a biodigestión (kW)	Potencia disponible en verano (kW)	Potencia disponible en invierno (kW)	Demanda de potencia cubierta en verano (%)	Demanda de potencia cubierta en invierno (%)
Planta A	127,81	130,81	28,475	19,290	21,77%	14,75%
Planta B	135,57	138,57	25,720	19,290	18,56%	13,92%
Planta C	98,85	101,85	22,045	13,778	21,64%	13,53%

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en cuanto a la potencia instalada, en ningún caso se llega a superar el 25% de la cobertura de la potencia instalada con la capacidad de generación de los lodos, pero este análisis no es muy concluyente, ya que los equipos eléctricos que demandan energía no están siempre conectados y funcionando como se mostró en la tabla 3 donde se especifica el tiempo de utilización de cada uno de ellos. Por tanto para lograr realizar un análisis más asertivo, se debe de tomar en cuenta la energía eléctrica y no la potencia eléctrica; para ello se asumirá que la planta de biogás funcionará las 24 horas del día, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de energía eléctrica cubierta

	Demanda de energía total (kWh)	Demanda de energía con biodigestión (kWh)	Energía disponible en verano (kWh)	Energía disponible en invierno (kWh)	Demanda de energía cubierta en verano (%)	Demanda de energía cubierta en invierno (%)
Planta A	945,31	969,31	683,41	462,95	72,29%	47,76%
Planta B	1339,12	1363,12	617,27	462,95	46,10%	33,96%
Planta C	753,41	777,41	529,09	330,68	70,23%	42,54%

Fuente: elaboración propia

Según se muestra en la tabla 9, el porcentaje de energía eléctrica demanda que es capaz de cubrir la planta de generación de biogás puede ser bastante alto, incluso alcanzando los 72,3% en el caso de la planta A en verano, pero existe cierta incertidumbre en cuanto a la energía disponible ya que puede variar mucho según la estación del año. Se puede observar en el caso de la planta C, que puede pasar de una cobertura del 70,2% de la demanda energética en verano a un 42,5% en invierno, lo que causaría serios problemas de funcionamiento de la planta, obligando a paros no calendarizados. Además cabe a destacar la excepción de la planta B, en donde no se alcanza ni un 50% de la cobertura de la demanda energética en verano.

Como se pudo demostrar en este análisis, el potencial energético del lodo utilizando solamente una caldera de gas no es suficiente para cubrir la demanda energética de la planta.

En la mayoría de casos en donde se aplica este sistema, se utilizan motores de cogeneración, con los cuales se aprovecha el calor que contienen los gases de escape de la caldera para vaporizar agua y aprovechar dicho calor para mantener la temperatura del biodigestor. Este caso se analizará a continuación.

4.3 Análisis de cobertura de demanda energética con motor de cogeneración

Utilizar un sistema de cogeneración es de gran beneficio, ya que a pesar de que genera costos adicionales de instalación y mantenimiento, significa un aprovechamiento energético más del doble que el caso de utilizar solamente una caldera de gas. Esto sería tomando en cuenta los porcentajes de eficiencia brindados por el fabricante del motor de cogeneración a utilizar dentro de la propuesta, significando un 34% de eficiencia en energía eléctrica y un 61% en energía térmica, es decir un total de un 95% del aprovechamiento del potencial energético inicial de los lodos.

Ahora bien, hay que tener en cuenta que la planta lo que utiliza en mayor parte para funcionar es energía eléctrica, utilizando la energía térmica solamente para procesos específicos como agua caliente sanitaria, lo cual no significa un consumo demasiado importante comparado con el resto. Por tanto esta energía térmica se puede utilizar de otra manera, utilizando una digestión termofílica en vez de una mesofílica.

Por parte del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba (R. Borja Padilla, A. Martín Martín, M.M. Durán Barrantes y R. Maestro Durán), se realizó una publicación con respecto a la comparación entre los dos procesos titulada *“Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del azechín en los intervalos mesofílico y termofílico de temperatura”*, en el cual se describen las principales diferencias entre ambos procesos de digestión. Dentro de ellos pueden mencionarse los más relevantes:

- Rangos de temperatura mayores: mesofílica entre 30-40°C, termofílica entre 50-60°C.
- Mayor volumen de metano generado por DQO: aproximadamente 20% más en el proceso termofílico independientemente del tiempo de retención.
- La velocidad específica de crecimiento de microorganismos es un 55% mayor en el proceso termofílico.
- El porcentaje medio de eliminación de materia orgánica es superior al 95% en ambos procesos para tiempos de retención entre 15 y 40 días, pero para tiempos de 10 días la degradación cae estrepitosamente, siendo un 87% para el proceso termofílico y un 57% para el mesofílico.

Como se puede observar en estos resultados, el proceso termofílico significaría un mayor volumen de metano generado a través de un calor residual de la caldera, por lo que su coste energético sería prácticamente nulo. A partir de estas premisas, se puede recalcular la energía eléctrica generada por el metano, según se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de energía eléctrica cubierta con cogeneración y digestión termofílica

	Demanda de energía total (kWh/día)	Energía disponible en verano (kWh/día)	Energía disponible en invierno (kWh/día)	Demanda de energía cubierta en verano (%)	Demanda de energía cubierta en invierno (%)
Planta A	969,31	820,09	555,54	84,61%	57,31%
Planta B	1363,12	740,72	555,54	54,34%	40,76%
Planta C	777,41	634,91	396,82	81,67%	51,04%

Fuente: elaboración propia

Como se muestra en la tabla 10, con este escenario un 20% más de producción de biogás y por lo tanto un 20% más en generación energética, existen períodos principalmente en verano donde se llega a cubrir hasta casi un 85% de la demanda. En invierno se mantiene un porcentaje aceptable de la cobertura de la demanda, sobre todo para la planta A y C. El caso de la planta B se mantiene con incógnita, al tener niveles aún bajos de la cobertura de la demanda, alcanzando apenas un 41% en invierno, pero aun así ha mejorado significativamente. En cuanto a la potencia térmica que puede llegar a cubrir este diseño, se debe de analizar primeramente las necesidades energéticas térmicas que pueda llegar a tener el biodigestor para mantener los 60°C de diseño.

Cálculo de calor requerido para el biodigestor

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Dónde:

m = masa de fango que entra al biodigestor (kg/h)

C_p = calor específico del fango, se asumirá igual al agua = 1 kCal/kgK

ΔT = Diferencia entre temperatura de entrada y de salida. Asumiendo una temperatura ambiente de 15°C = 60 – 15 = 45°

Tomando en cuenta que 1 kCal/h = 0.001163 kW:

Tabla 11. Porcentaje de energía térmica cubierta con cogeneración y digestión termofílica

	m (kg/h)	Calor requerido (kCal/h)	Calor requerido (kW)	Potencia térmica disponible en verano (kW)	Potencia térmica disponible en invierno (kW)	Demanda de potencia térmica cubierta en verano (%)	Demanda de potencia térmica cubierta en invierno (%)
Planta A	1311,69	59025,94	68,65	51,09	34,61	74,42%	50,41%
Planta B	1184,75	53313,75	62,00	46,14	34,61	74,42%	55,82%
Planta C	1015,50	45697,50	53,15	39,55	24,72	74,42%	46,51%

Fuente: Elaboración propia

Todo lo propuesto anteriormente requiere ciertos equipos específicos para poder conseguir las mejoras; este diseño se analizará en el siguiente apartado.

5. DISEÑO DE LA PLANTA DE COGENERACIÓN DE BIOGÁS

Para conocer el diseño de la planta propuesta, se deben de determinar los equipos y procesos necesarios a agregar al proceso de depuración del agua residual. Específicamente se añadirían máquinas en la línea de lodos, quedando la línea de agua tal y como se encuentra actualmente. Los equipos que se tendrían que añadir serían los siguientes:

5.1 Espesante gravitatorio

El equipo espesante gravitatorio se encuentra justo al principio de la línea de fangos, a la salida de los procesos primarios y secundarios. Suele ser un tanque circular con el fondo cónico con un pozo de alimentación en el centro, por donde entran los lodos. El lodo sedimenta y compacta hasta que se extrae por el fondo cónico del tanque.

Se suelen utilizar canales para que el agua desagüe y ayude a la densificación, logrando que el lodo sedimente de mejor manera. El flujo acuoso resultante es retirado y devuelto al decantador primario o al caudal de entrada de la EDAR. Finalmente el lodo espesado es bombeado al digestor anaerobio para su digestión.

Este tipo de espesante gravitatorio suele ser más efectivo con los fangos primarios, suele emitir fuertes olores, principalmente en climas cálidos, en pequeñas depuradoras se suelen espesar los lodos de los procesos primarios y secundarios en conjunto.

Sus parámetros de funcionamiento según las necesidades de la planta serían los siguientes:

- Caudal de entrada mínimo: 300 m³/día
- Caudal de entrada máximo: 650 m³/día
- Modelo y marca de referencia: Xinhai NZSG-5
- Potencia de motor: 1,5 kW

5.2 Digestor anaerobio

Su funcionamiento se explicó previamente en el apartado 1.3, en este apartado se añadirán algunos detalles técnicos al respecto.

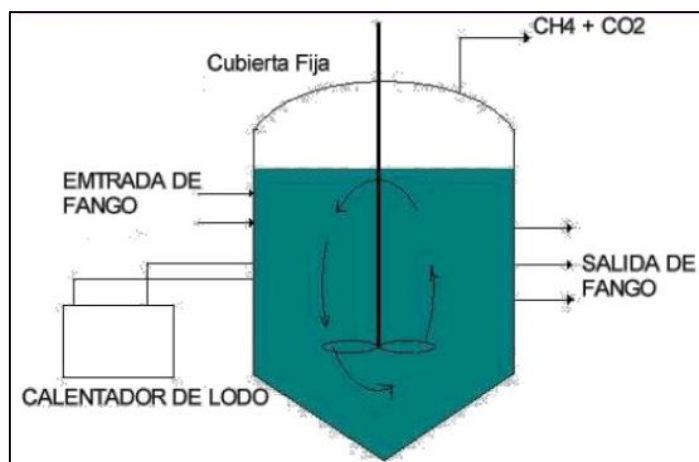
El digestor anaerobio suele ser un recipiente aislado normalmente cilíndrico con un volumen dependiente del tiempo de retención de diseño y las espumas generadas, construidos de hormigón armado o acero. En la parte superior se recoge el gas y en la parte inferior se recogen los fangos procesados.

Un biodigestor puede contar con cubierta fija o flotante. La cubierta flotante permite variaciones del volumen de gas, ya que se ajustan a la superficie del contenido del digestor, pero pueden presentar cierto riesgo al entrar aire que se mezcle con el gas, pudiendo causar una explosión. Suele tener altos costes de operación y mantenimiento. Los de cubierta fija

tienen un espacio libre entre la cubierta y la superficie del líquido, requiriendo un gasómetro para evitar la entrada de aire cuando se modifica el volumen de salida. Por cuestiones de seguridad se utilizará en el diseño un biodigestor de cubierta fija.

De ser necesario, se puede instalar un sistema de calefacción a través de un intercambiador interno formado por un serpentín alimentado por el agua del circuito de salida del motor de cogeneración, para mantener la temperatura ideal de trabajo del biodigestor.

Figura 5. Biodigestor de cubierta fija



Fuente: Mendoza Y. (2014), Digestión Anaerobia, recuperado de <https://es.slideshare.net/yazminmendozacastillo/digestion-anaerobia-31879582>, consultado en mayo de 2019.

Existen otros componentes que forman parte del biodigestor que se deben de tomar en cuenta, como los siguientes:

- Red de tuberías: tubería de entrada de lodos, salida del sobrante y extracción de lodos.
- Circuito de gas: que dirija el gas desde el digestor hasta los puntos de consumo o la antorcha. Compuesto de cúpula de gas, válvulas de seguridad, sistema contra incendios, válvulas térmicas, separadores de sedimento (retenedor de humedad), medidores de gas, manómetros indicadores, reguladores de presión y muestreador.
- Acceso al digestor: para su vaciado, limpieza y/o reparación.

En cuanto a los parámetros del biodigestor, se tienen los siguientes:

- Tipo de biodigestión: termofílica (temperatura de trabajo entre 55°C y 60°C)
- Flujo de entrada de lodos máximo: 32 m³/día
- Flujo de entrada de lodos mínimo: 15 m³/día
- Producción de biogás: hasta 350 m³/día
- Potencia de agitador: 1,5 kW
- Modelo de referencia: ClearBlue 250

5.3 Gasómetro

Es el tanque de almacenamiento del biogás, el cual es necesario para suministrar gas según la demanda de la planta, ya que la generación de biogás será continua durante el día, pero la demanda energética de la planta no, por tanto el gasómetro tiene la función de cubrir la diferencia entre producción y consumo. El gasómetro suele estar construido de metal inoxidable, de forma cilíndrica, cuando se alcanza el nivel máximo de almacenamiento se enciende la antorcha situada a un lado del mismo, donde se incinera el biogás sobrante.

Parámetros de funcionamiento:

- Volumen máximo de entrada: 350 m³/día
- Volumen de diseño: 1750 m³

5.4 Antorcha

Es un sistema de eliminación de excesos de biogás que pueden llegar a generarse en el proceso, debe de contar con una válvula de seguridad la cual desviaré el biogás excedente hacia la atmósfera a través de un sistema controlado, el cual emite CO₂ en vez de CH₄. También cuenta con un caudalímetro para controlar el flujo de biogás eliminado.

5.5 Motor de cogeneración

Los motores de cogeneración convierten la energía de un combustible (en su mayoría de casos biogás) en potencia mecánica, al cual se le incorpora un generador eléctrico para obtener energía eléctrica. Pero además se puede obtener energía calorífica por medio de una serie de intercambiadores de calor ubicados en el sistema de refrigeración del motor y de salida de los gases de escape, recuperando la energía térmica liberada de la combustión del biogás. Estos gases de escape se encuentran aproximadamente a 500°C, mientras que en el ciclo de refrigeración del motor el agua llega entre 90 y 100°C, calor que puede ser aprovechado para agua caliente útil o en este caso para mantener la temperatura del biodigestor. El calor de los gases de escape se puede aprovechar para un ciclo combinado, generando vapor y a través de un sistema turbina-generador para producir energía eléctrica, pero este no será el caso de este análisis, ya que como se detalló anteriormente, el calor producido se utilizará para mantener una biodigestión termófila.

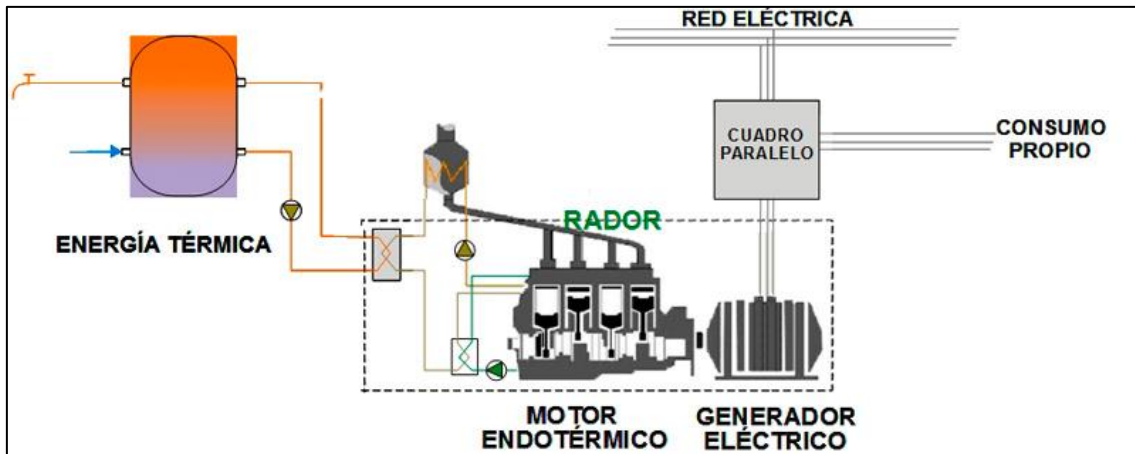
Las emisiones tóxicas de los gases de escape pueden reducirse a través de un catalizador de oxidación, el motor cuenta con una gran versatilidad de funcionamiento, logrando adaptarse según la demanda energética de la planta y con períodos de arranque relativamente cortos.

Los parámetros de funcionamiento de nuestro motor de cogeneración serían los siguientes:

- Potencia eléctrica instalada: 60 kW
- Potencia térmica: 89 kW

- Eficiencia conjunta: 95,2 %
- Modelo de referencia: CHP CE 50-3 NA (80/40)

Figura 6. Motor de cogeneración



Fuente: Absorbsisem, Principio de la Cogeneración, recuperado de <https://www.absorsistem.com/tecnologia/cogeneracion/principio-de-la-cogeneracion>, consultado en mayo de 2019.

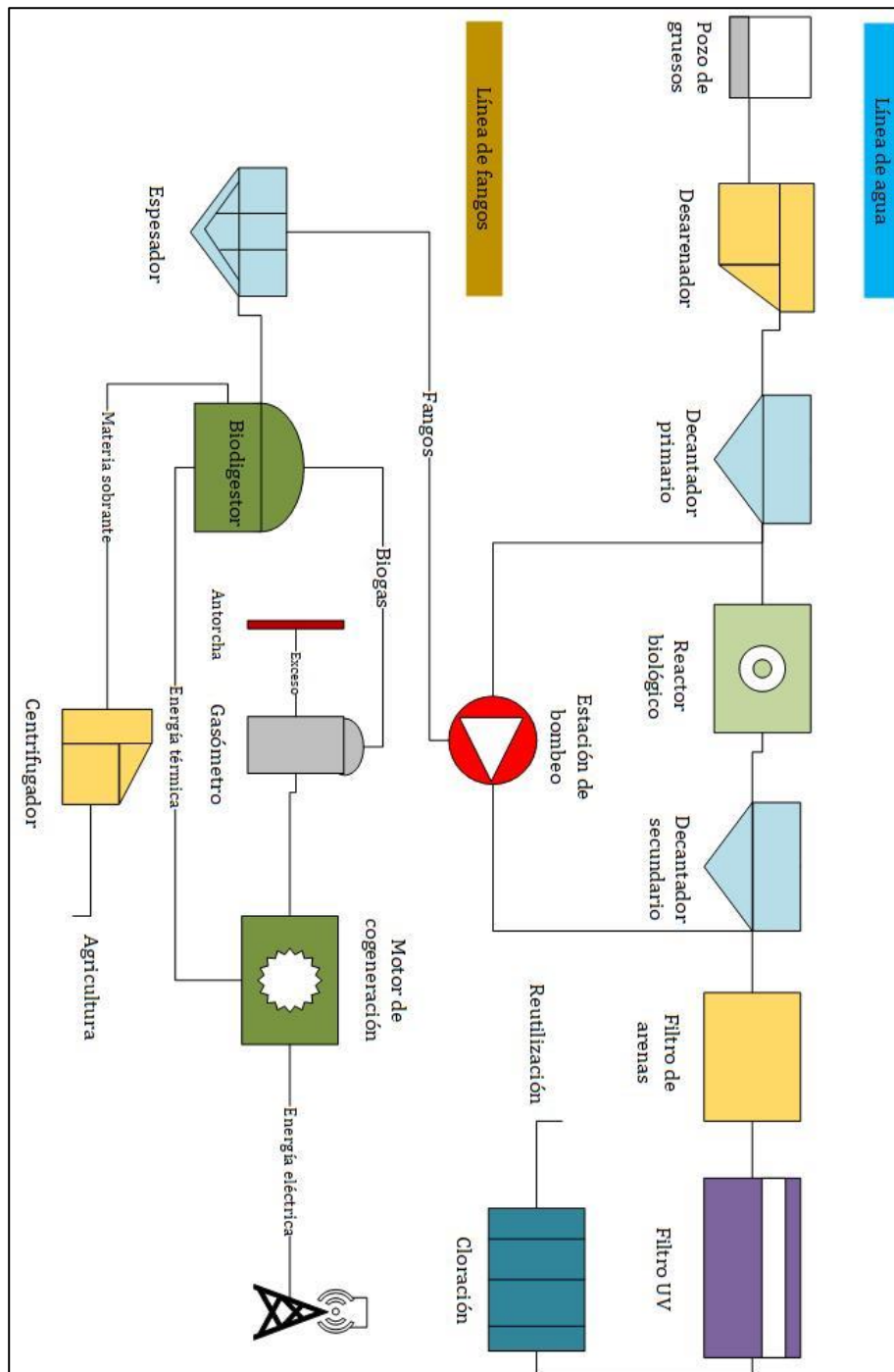
5.6 Diagrama de diseño final

Los componentes descritos anteriormente requieren cierta configuración específica en la línea de lodos para funcionar adecuadamente, la cual no debe interferir con la línea de aguas para evitar el aumento del costo de la mejora.

El diagrama de flujo final de la configuración de la planta propuesta se muestra en la figura 7. Como se puede observar, existen varios componentes que no se analizaron, como por ejemplo el centrifugador que procesa la materia sobrante del biodigestor que puede utilizarse como abono en aplicaciones de agricultura, esto no se especificó debido a que se delimitó el análisis al sistema de demanda-producción energética.

En la figura 7 se muestra la planta una vez aplicadas las mejoras propuestas.

Figura 7. Diagrama de planta



Fuente: elaboración propia

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se llevarán a cabo, el análisis económico de la situación actual y el de la propuesta de mejora, para poder determinar el flujo de efectivo y con ello el tiempo de retorno de inversión. A continuación se realizará el proceso descrito anteriormente.

6.1 Situación económica actual

Actualmente ninguna de las plantas depuradoras analizadas cuenta con un sistema de aprovechamiento energético de los lodos, limitándose al agitador y al uso de los lodos como abono en aplicaciones agrícolas. Por tanto la factura eléctrica está condicionada por el consumo de kWh y por el precio medio de la energía eléctrica.

A la fecha 9 de mayo de 2019, el precio por kWh según la Red Eléctrica de España es de 0,13 €/kWh en el caso de la omisión de la discriminación horaria. Con estos datos se puede obtener el costo mensual de la factura eléctrica a partir de una multiplicación del consumo por el precio:

Tabla 12. Costos actuales de energía eléctrica

	Consumo diario (kWh)	Consumo mensual (kWh)	Costo unitario de energía eléctrica (€/kWh)	Costo mensual de energía eléctrica (€)	Costo anual de energía eléctrica (€)
Planta A	969,31	29.079,30	0,13	3.780,31	45.363,71
Planta B	1363,12	40.893,60	0,13	5.316,17	63.794,02
Planta C	777,41	23.322,30	0,13	3.031,90	36.382,79

Fuente: elaboración propia

6.2 Situación económica según propuesta

El continuar utilizando la red eléctrica para obtener la energía necesaria para cubrir la demanda de la planta sería demasiado costoso, además de poco lógico al desaprovechar la posibilidad de utilizar el motor de cogeneración que trabaja con gas natural. Por esto mismo se propondrá utilizar este combustible fósil como complemento dentro del sistema para cubrir las necesidades energéticas.

Según el IDAE en su último informe de precios de octubre 2018, el gas natural se encontraba en la cifra de 0,0522 €/kWh en Tarifa de Último Recurso con consumos por debajo de los 50.000 kWh/mes pero mayor a 5.000 kWh/mes, siendo el caso de la planta de biogás. Los resultados se muestran en la tabla 13.

Para conocer la viabilidad del proyecto, se requiere una comparación de la situación actual con la propuesta; en el caso de la nueva configuración, se tendrían ciertos ahorros energéticos, los

cuales en este análisis se tomarían como los ingresos, mientras la inversión inicial por la compra e instalación de los equipos, mantenimiento de los mismos y la demanda energética que no se logre cubrir con la generación de biogás serían los gastos.

Tabla 13. Costos de energía eléctrica según propuesta

	Consumo anual (kWh)	Consumo no cubierto en verano (kWh)	Consumo no cubierto en invierno (kWh)	Consumo anual total no cubierto (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (€)	Ahorro anual de energía eléctrica (€)
Planta A	353.798,15	104.354,84	184.820,42	289.175,26	15.037,11	30.326,59
Planta B	497.538,80	272.235,16	184.820,42	457.055,59	23.766,89	40.027,13
Planta C	283.754,65	90.637,25	233.099,77	323.737,02	16.834,33	19.548,46

Fuente: elaboración propia

Se debe de tomar en cuenta también que según se mostró en la tabla 11, existe cierta demanda térmica que no se logra cubrir totalmente con el calor proveniente del recuperador de calor del motor de cogeneración. Afortunadamente las ventajas de dicho motor son muy útiles en casos como estos, ya que al utilizar gas natural para generar la energía eléctrica complementaria también se hace funcionar el recuperador de calor. Para determinar si este calor generado es suficiente, se debe de recalculer la potencia térmica según la generación complementaria, mostrado en la tabla 14.

Tabla 14. Capacidad de potencia térmica total

Energía térmica	Calor requerido (kW)	Potencia térmica disponible en verano (kW)	Potencia térmica disponible en invierno (kW)	Potencia térmica por generación complementaria verano (kW)	Potencia térmica por generación complementaria invierno (kW)	Potencia térmica total verano (kW)	Potencia térmica total invierno (kW)
Planta A	68,65	51,09	34,61	21,20	37,55	72,29	72,16
Planta B	62,00	46,14	34,61	55,32	37,55	101,46	72,16
Planta C	53,15	39,55	24,72	18,42	47,37	57,97	72,09

Fuente: elaboración propia

Como se ve en la tabla, en los tres casos se logra cubrir la demanda térmica sin requerir energía adicional, incluso por encima de lo requerido, el cual se podría aprovechar en otros procesos dentro de la planta como agua caliente sanitaria (ACS) o calefacción.

Para determinar la viabilidad económica del proyecto al tratarse de un caso de ahorro energético, los ingresos vendrían representados por los ahorros económicos que significaría la aplicación de la propuesta, los cuales se muestran en la tabla 13.

En cuanto a los costos de inversión inicial y de mantenimiento, es necesario recurrir a los datos publicados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés), la cual publica cada año el progreso tecnológico y económico de cada una de las principales energías renovables alrededor del mundo, incluyendo la digestión anaerobia en Europa.

Según el último reporte para el año 2018, los costes por kW instalado en Europa para el caso de biogás obtenido a partir de digestión anaerobia en proyectos menores a 1 MW fue de 3.800 \$/kW, equivalente a 3.344 €/kW (tipo de cambio 0,88 € = 1 \$ el 11 de junio de 2019). Además se detalla el costo de operación y mantenimiento, el cual alcanza los 4,68 \$/MWh, es decir unos 0.0041 €/kWh. Tomando en cuenta esto, se puede realizar un análisis económico tomando los siguientes parámetros:

- a) Financiación: 50% de la inversión inicial
- b) Tasa de inflación (INE cierre 2018): 1,2%
- c) Tasa de interés: 12% anual
- d) Años de financiación: 15

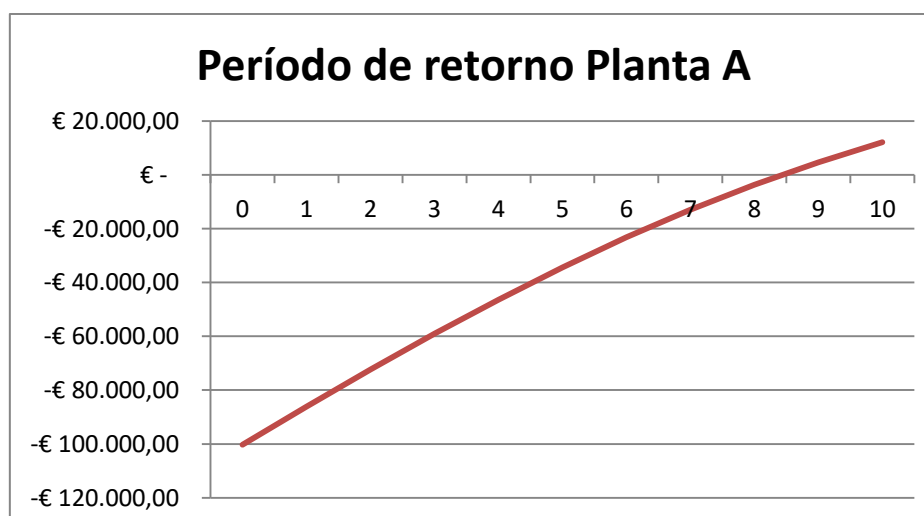
Realizando una proyección según los parámetros y los costos e ingresos mostrados anteriormente, se tienen los resultados mostrados en la tabla 15 y en las figuras 8, 9 y 10.

Tabla 15. Costos y ahorros

Parámetro	Caso A	Caso B	Caso C
Ahorro energético anual	€ 30.326,59	€ 40.027,13	€ 19.548,46
Total inversión inicial	€ 200.640,00	€ 200.640,00	€ 200.640,00
Inversión inicial de fondos propios	€ 100.320,00	€ 100.320,00	€ 100.320,00
Inversión a financiar	€ 100.320,00	€ 100.320,00	€ 100.320,00
Pago nivelado	-€ 14.729,41	-€ 14.729,41	-€ 14.729,41
Operación y mantenimiento	-€ 1.457,08	-€ 2.049,06	-€ 1.168,62
VAN	-€ 24.114,27	€ 18.050,89	-€ 72.672,87
TIR	5,39%	16,61%	-13,03%

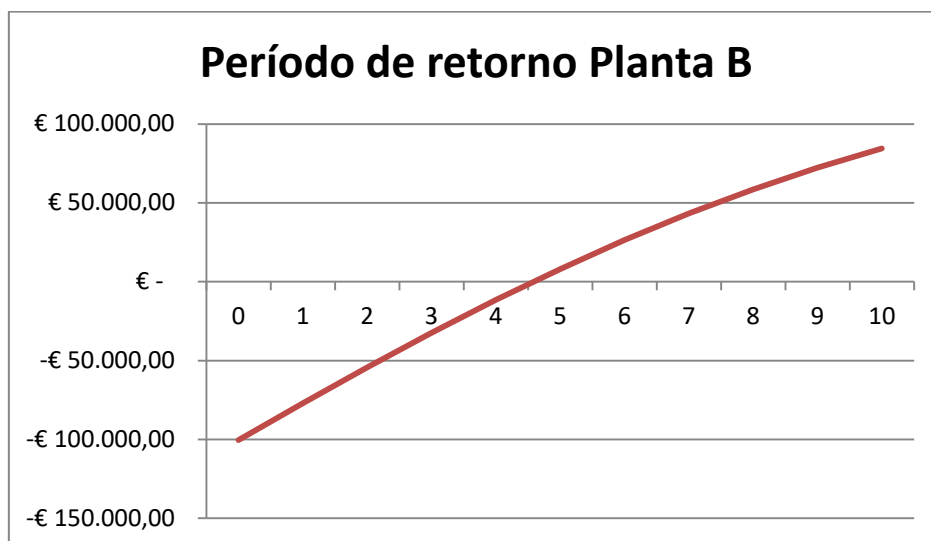
Fuente: elaboración propia

Figura 8. Período de retorno planta A



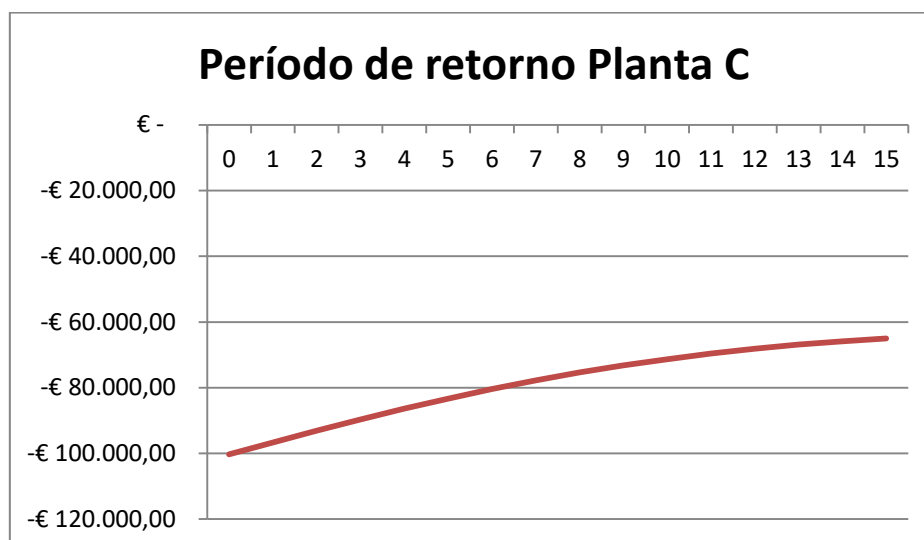
Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Período de retorno planta B



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Período de retorno planta C



Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

- 1) Según las estimaciones y cálculos realizados, se logró observar la relación directa existente entre el potencial energético de los lodos provenientes de una depuradora de aguas residuales con las concentraciones de DQO de los mismos. Estas concentraciones indican la materia orgánica presente en los lodos, la cual será luego descompuesta en un proceso anaeróbico para la obtención de biogás. Las concentraciones de DQO pueden variar en función de las aguas residuales que se viertan en la estación depuradora; domésticas, industriales, ganaderas, etc.
- 2) Un factor determinante en el potencial de producción de biogás es el caudal de agua/lodos que reciba la depuradora, ya que a mayor caudal, mayor cantidad de materia orgánica recogida y por tanto mayor potencial energético del lodo.
- 3) En los tres casos analizados se obtuvieron distintos potenciales energéticos, los cuales dependieron directamente del caudal manejado por cada planta, alcanzando 332,39 m³/día en la planta A, 300,22 m³/día en la planta B y 257,33 m³/día en la planta C, de biogás en época de verano (máxima), fluctuando debido a los distintos caudales de entrada que maneja cada una de ellas.
- 4) El volumen de combustible generado se traduciría en 28,48 kW (683 kWh) en la planta A, 25,72 kW (617,27 kWh) en la planta B y 22,05 kW (529,09 kWh) en la planta C de potencia (y energía), lo cual se tradujo en una cobertura del 72,29%, 46,10% y 70,23% de la demanda energética respectivamente, mostrando una proporcionalidad directa con el caudal de entrada y el consumo de los equipos que componen cada una de ellas.
- 5) El análisis realizado en este trabajo se vio condicionado por un factor determinante; el uso del motor de cogeneración a través de gas natural para cubrir con la demanda energética faltante de cada planta. El gas natural, actualmente, tiene un precio de menos de la mitad que la energía eléctrica (0,0522 €/kWh contra 0,13 €/kWh), lo que disminuyó significativamente los costos de la energía requerida, haciendo viable el proyecto en uno de los tres casos.
- 6) La utilización de un motor de cogeneración genera la potencia térmica faltante requerida para mantener una biodigestión termófila, obteniéndose varios beneficios tanto técnicos como económicos con esta aplicación.
- 7) En la Planta A se tiene un tiempo de retorno cercano a los 8,5 años, lo cual es bastante acertado en este tipo de proyectos; esto se debe a un ahorro energético anual superior a los 30.000 €, lo que se traduce en un flujo de efectivo positivo a partir del noveno año de la inversión. Lamentablemente no significa que sea un proyecto financieramente atractivo, ya que el Valor Actual Neto (VAN) es negativo y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es menos de la mitad que la tasa de interés utilizada (5,29%)


- 8) En la planta B se obtuvieron valores aún más positivos con un tiempo de retorno cercano a los 4,5 años y ahorros por más de 40.000 € anuales, aunado a un VAN positivo sobre los € 18.000 y una TIR con más de 6% sobre la tasa de interés utilizada.
- 9) En la Planta C se obtuvieron resultados totalmente distintos, ya que a pesar de proyectar la inversión para 15 años no se logra recuperar la inversión inicial, probablemente debido a sus menores ingresos anuales, los cuales no alcanzaron los 20.000 €, además de un VAN y una TIR negativos, significando que el proyecto no es viable económicamente.
- 10) Cabe recalcar que en un principio la Planta B parecía la menos viable técnica y económicamente al no llegar a cubrir ni un 50% de la energía demandada, pero el factor del gas natural junto al motor de cogestión fueron determinantes para revertir la situación y convertirlo en el proyecto más atractivo económicamente.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Martí T; Rovira M.; Vila, I. (2009), Implantació de la Digestió Anaeròbia en la EDAR de Castell-Platja d'Aro, Universitat de Girona.
2. Campos E., Flotats X. (2011), Aprovechamiento Energético de los Lodos Residuales y Purines. Producción de Biogas, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida.
3. Francesc S., Estudios EDAR, Estación Depuradora. Recuperado de <https://www.uv.es/~fhdez/edar.DEFINICION.edar.sXIX.html>, consultado del 29 de marzo de 2019.
4. Secretariado Alianza por el Agua, Ecología y Desarrollo (2008), Manual de Depuración de Aguas Residuales, España, CENTA
5. International Renewable Energies Agency (IRENA) (2019), Renewable Power Costs in 2018.
6. Freixes, A. (2009), IV Jornades tècniques de gestió de sistemes de sanejament d'aigües residuals, Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Agència Catalana de l'Agua.
7. Martín, M. (2018), Valorización de fangos de EDAR via digestión y cogeneración de biogás, Universidad de Valladolid.
8. Borja, R.; Martín, A.; Durán, M.; Maestro, R. (2002), Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los intervalos mesofílico y termofílico de temperatura, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Córdoba.

9. ANEXOS

9.1 Biodigestor de referencia




Bio250 Specifications

The Bio 250 is a fully self-contained aerobic digester made from carbon steel, epoxy coated on the interior. Functions include recirculation from treatment tanks for accelerated bioreaction. The Bio250 has a separate container for recirculation and spraybar pumps and controls.

ClearBlu Bio250 models have the following features:

- NEMA 4 control panels
- Flow range from 90 to 250 GPM
- 60,000 square feet of fixed film media
- 16,755 gallons tank capacity
- Ultrafine Bubble aeration, .02 MM bubble size, 11 #'s of O2 per horsepower hour
- Blue White digital/programmable peristaltic metering pump for microbe injection
- Goulds industrial pumps with Viton double hard face silicon seals

9.2 Motor de codigestión de referencia:


BOSCH
 Invented for life

9.3

Combined Heat and Power CHP CE 50-3 NA (80/40)

Technical Data

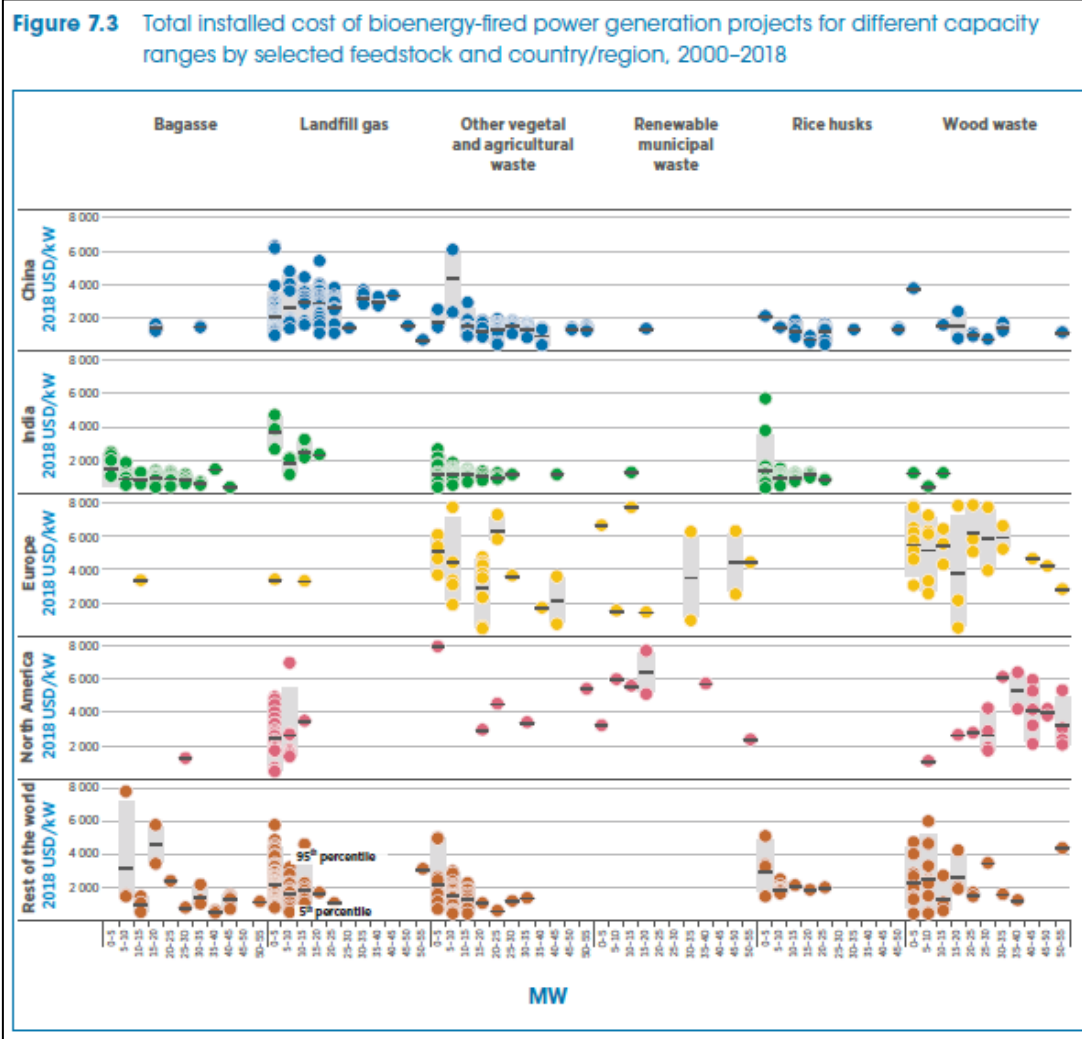
Unit	Performance data Outlet / Inlet 80 °C / 40 °C
CHP Outputs	
Electrical output at cos(phi)=1	kWel 50
Thermal output effective	kWth (± 7%) 89
Gas consumption DIN ISO 3046-1	kW (± 5%) 146
Modulation Range	50% - 100%
Efficiency at mains parallel operation	
Electrical efficiency effective	34,2%
Thermal efficiency effective	61,0%
Overall efficiency effective	95,2%
Power to heat ratio (AGFW FW308)	kWel / kWth 56,2%
Noise	
Primary Silencer	dB(A) in 1m 70,0
Secondary Silencer	dB(A) in 1m 46,0

9.3 Espesador gravitacional de referencia:

Model	Tank Diameter (mm)	Tank Depth (mm)	Subsidence Area (m ²)	Capacity (t/d)	Motor Model	Motor Power (kW)	Steel Tank Weight (kg)	Weight (kg)
NZSG-2.5	2500	1850	4.9	5~22.4	Y90L-6	1.1	1000	2225
NZSG-3A	3000	1800	7	5~23.3	Y100L-6	1.5	1664	3168
NZSG-3	3600	1800	10.2	5~28.5	Y100L-6	1.5	2097	3680
NZSG-5	5000	2956	16	16~90	Y90L-4	1.5	5160	8031
NZSG-6	6000	2956	28.3	98	Y90L-4	1.5	5769	9200
NZSG-7	7000	3000	38.5	140	Y112M-6	2.2	8800	13862
NZSG-8	8000	3318	50.2	185	Y132S-6	3	12966	19158
NZSG-9	9000	3376	63	210	Y132S-6	3	15418	21733
NZSG-12	12000	3600	113	370	Y132S-6	3	25589	34823
NZSG-15	15000	3600	176	580	Y132S-4	5.5	35800	54315
NZSG-18	18000	4400	255	960	YCT200-4B	7.5	52485	73588
NZSG-20	20000	4400	315	1400	YCT200-4B	7.5	59365	76312

Note: The specification can be designed according to the requirements of the users.
 If adding flocculant, the capacity can be improved by 3-6 times.
 The concrete structure can be adopted if the thickening diameter is greater than $\phi 7m$.

9.4 Costo de inversión por kW instalado según reporte de IRENA 2018



9.5 Costo de operación y mantenimiento por kW instalado según reporte de IRENA 2018

Table 4 Fixed and variable O&M costs for bioenergy power

COUNTRY	FIXED O&M (% OF CAPEX/YEAR)	VARIABLE O&M (2018 USD/MWH)
STOKER/BFB/CFB BOILERS	3.2	4.25–5.24
GASIFIER	3–6	4.25
ANAEROBIC DIGESTER	2.1–3.2	4.68
	2.3–7	
LANDFILL GAS	11–20	n.a

10. ABSTRACT

Human activities signify environmental impact, regardless of its size, location or typology; every resource usage carries a high probability of an alteration of an ecosystem's equilibrium. This behavior is not an exception to water exploitation and even more significant regarding the results of the water treatment process that are normally different types of sludge depending on the activity it is used.

But there is a possibility to change this situation and come up with an energy source instead of having an environmental threat. Water treatment sludge is usually composed of organic matter with an important energetic potential, which is available through a process of anaerobic digestion, where a group of bacteria transform the matter in biogas in an acid environment. This fuel is composed about 60% of methane, better known in nowadays fuel industry as natural gas, applied for domestic or industrial use, or even electric energy generation.

In this Masters Final Work, a specific quantitative method was used to estimate the biogas production potential of three different water treatment plants located in Girona, Cataluña, where the fuel production is directly proportional to the water/sludge flow going through it and of course the sludge chemical oxygen demand (oxygen required to oxidize soluble and particle organic matter in water). This potential was measured in volume (m^3 of biogas/day) and expressed afterwards as power (kW/day) and energy (kWh/day), which was compared to the complete system's energy demand to determine if this potential was enough to design a self-sustainable treatment plant using biogas as fuel only.

After the mentioned calculations, it was noticed that in none of the three cases the energy produced was enough to cover the system's demand, forcing it to come up with a viable solution; on this occasion a cogeneration power plant was proposed to use the additional heat produced to change from a mesophilic to a thermophilic bio digestion, which increased the energy production rate about 20%. As the energy was still not enough to reach a self-sustainable system, natural gas fossil fuel was chosen to cover the missing demand because of its low environmental print and low cost.

Financially, only two of the three options were viable, with a payback period of 8,5 and 4,5 years depending on the energy costs savings each alternative generated, but it is important to stand out that these two options resulted economically attractive because of the usage of natural gas as a complementary energy source, since in Spain its price is about half the electricity's, which caused higher energy saving costs and therefore viable solutions.